

자연하천에서 Chiu의 유속분포와 최대유속 추정을 이용한 유량산정

Discharge Computation in Natural Rivers Using Chiu's Velocity Distribution and Estimation of Maximum Velocity

김창완* / 이민호** / 유동훈*** / 정성원****

Kim, Chang Wan / Lee, Min Ho / Yoo, Dong Hoon / Jung, Sung Won

Abstract

It is essential to obtain accurate and highly reliable streamflow data for water resources planning, evaluation and management as well as design of hydraulic structures. A new discharge computation method proposed in this research uses Chiu's velocity distribution and estimation of maximum velocity. This method shows acceptable channel discharges comparing these by the exiting velocity-area method. When velocity-area method is used, it is required to observe velocities at every specified point and vertical line using a velocity meter like Price-AA. If the method proposed in this research, is used, however it is not necessary to observe all point velocities needed in the velocity-area method. But this method can not be applied for the cases of very complex and strongly asymmetric channel cross-sections because Chiu's velocity distribution using entropy concept may be quite biased from that of natural rivers.

keywords : discharge estimation, velocity-area method, maximum velocity, Chiu's velocity distribution

요 지

수자원의 계획□평가□관리 및 수공구조물의 설계를 위해서는 정확하고 신뢰성 높은 유량 자료가 필수적이다. 본 연구에서는 Chiu의 유속분포와 최대유속 추정을 이용하여 하천유량을 계산하는 새로운 방법을 제시하였다. 기존 면적유속법과 비교□검토한 바, 본 연구에서 개발한 방법은 기존 유속면적법과 매우 유사한 하천유량을 보였다. Price-AA를 이용하여 유속을 측정할 경우 측선의 수심에 따라 정해진 지점에서 유속을 측정하여야 하는데, 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 임의의 측선과 측점에서 유속을 측정하여도 정확한 유량계산이 가능하다. 그러나 흐름 단면이 매우 복잡하거나 좌우의 비대칭성이 심한 경우에는 엔트로피 개념의 Chiu의 유속분포가 실제 자연하천의 흐

* 한국건설기술연구원 하천□해안연구실 책임연구원
Research Leader, River & Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea
(e-mail: cwkim@kict.re.kr)
** 국토해양부 한강홍수통제소 하천정보센터 시설연구사
Researcher, River Information Center, Han River Flood Control Office, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Seocho-gu, Seoul 137-049, Korea
*** 아주대학교 환경건설교통공학부 교수
Professor, Division of Environmental, Civil & Transportation, Aju University, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-749, Korea
**** 유량조사사업단 단장
Director, Hydrological Survey Center, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-802, Korea

틈분포에서 멀어지고 유량산정에 Chiu의 유속분포의 정확도가 떨어지기 때문에 본 연구에서 제시한 방법을 적용하기 어렵다.

핵심용어 : 유량산정, 유속면적법, 최대유속, Chiu의 유속분포

1. 서론

최근 우리나라에서도 하천 유량의 효율적인 측정을 위해 초음파유속계나 유속지수법과 같은 실시간 하천유량측정 방법들이 도입되고 있다(김창완 등, 2004; 김치영 등, 2006). 이러한 방법들은 흐름 단면 전체를 측정하지 않고 단면의 특정 영역이나 지점에서 연속적인 유속을 측정하고 이를 단면 전체에 대한 관계로 환산하여 유량을 산정한다. 따라서 측정 영역의 유속과 전체 단면의 유속 사이에 합리적이고 이론적인 관계를 수립하는 것이 필요하다.

기존에는 연직방향의 주 유속분포를 나타내는 식으로 로그법칙(log law)이나 멱법칙(power law)이 주로 사용되어 왔으나 이들은 횡방향 유속 변화를 반영할 수 없다. 뿐만 아니라 하상으로부터 수면까지 유속분포가 단조증가하는 함수 형태로 되어 있어 최대유속이 수면 아래에서 발생하는 물리적인 현상을 나타낼 수 없다는 한계가 있다.

Chiu(1987, 1988)는 기존의 결정론적인 흐름 방향 유속분포식의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 확률통계에서 사용되는 엔트로피 개념을 이용한 단면 2차원 유속분포식을 제안하였다. Chiu의 식은 흐름단면에서 유속이 동일한 점들을 연결하는 등유속선과 유속과의 1:1 대응 관계를 이용하므로 수면 아래에서 최대유속이 나타나는 실제 현상을 이론적으로 재현할 수 있다. 하지만 이론적인 유속분포식을 검증할 수 있는 실측자료의 제약으로 인해 그가 제안한 유속분포식은 단면 형상이 일정한 직사각형이나 사다리꼴 등의 실험수로 또는 운하에만 제한적으로 적용된 바 있다(Chiu, 1988; de Araujo and Chaudhry, 1998). Chiu and Murray(1992)는 확률론적인 유속분포의 분석을 통해 불규칙한 개수로 단면에서 평균유속, 운동량 보정계수, 에너지 보정계수 등을 결정할 수 있음을 보여준 바 있다. Chiu and Said(1995)는 다양한 유량과 수심 조건에 대한 분석을 통해 하도 단면의 평형 상태는 엔트로피 매개변수인 M 값에 일정하게 반영된다는 점을 밝힌 바 있다. 또한 최대유속 지점에서의 연직 유속분포를 이용하여 유량을 결정하는 기법을 개발한 바 있다. Chiu and Tung(2002)은 개수로에서의 평균유속과 최대유속의 관

계가 시간과 유량이 변하더라도 일정하게 유지되는 특성이 있음을 밝힌 바 있다. Moramarco *et al.* (2004)은 엔트로피 유속분포식의 주요 매개변수인 M 값이 이탈리아 Tiber 강의 4개 관측소에서 거의 일정하게 나타난다는 점을 밝힌 바 있다. 또한 Chiu의 유속분포를 활용할 경우 연직방향 유속분포를 합리적으로 추정할 수 있다는 점을 보여주었다.

추태호(2002)는 엔트로피 개념을 이용하여 표면유속 측정을 통한 유량산정 방법을 국내 하천에 적용한 바 있다. 김영성 등(2001)은 엔트로피 매개변수 M 을 이용하여 간단하게 유량을 산정하는 기법을 이용하여 유량을 산정하고 이를 한강대교, 여주, 유성 지점 등에서의 실측자료와 비교함으로써 적용성을 검토한 바 있다. 오제승 등(2005)도 M 값을 이용하여 홍수량을 추정하는 연구를 수행한 바 있다.

엔트로피 유속분포식은 Chiu에 의해 제안된 이래로 여러 방면에서 연구의 진전이 있었다. 하지만 하천 단면의 2차원 유속분포에 관한 실측자료가 적었던 관계로 자연하천의 유속분포를 모의하는 연구에는 거의 적용되지 못하였다. 본 연구에서는 Chiu가 제안한 엔트로피 유속분포식을 이용하여 자연하천의 무차원 유속분포를 모의하였다. 무차원 유속분포와 실측유속을 이용하여 최대유속을 추정하였다. 추정된 최대유속을 무차원 유속분포에 대입하여 단면 전체에 대한 유속분포를 추정하여 유량을 산정하였다. 본 연구에서 개발된 유량산정 방법의 적용성을 검토하기 위하여 2005년도 유량측정성과(한강홍수통제소, 2006; 낙동강홍수통제소, 2006; 금강홍수통제소, 2006; 영산강홍수통제소, 2006)에 나타나 있는 유량자료를 이용하였다. 유속면적법으로 산정한 전통적인 유량측정성과와 본 연구에서 개발된 지표유속법을 이용하여 산정된 유량을 비교·검토하여 개발된 유량산정 방법의 적용성을 검토하였다.

2. Chiu의 유속분포

Chiu(1987, 1988)가 제안한 단면 2차원 유속분포식은 확률통계에서 사용되는 엔트로피 최대화의 개념을 수리학적으로 응용한 것이다. Chiu(1988)에 의하면 개수로 단면에서 2차원 유속분포는 1) 등유속선 기반의 좌표계, 2) 엔트로피에 기초한 유속분포식, 3) 수리학적 매

개변수 M 등의 3가지 요소로 구성된다.

2.1 등유속선에 의한 $\xi-\eta$ 곡선좌표계

엔트로피 유속분포식에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 단면상의 동일한 유속을 가지는 점들을 연결하는 등유속선(isovel) ξ 와 직교선 η 로 구성되는 $\xi-\eta$ 좌표계를 이용한다. $\xi-\eta$ 좌표계는 원통좌표계와 유사한데, $\xi-\eta$ 좌표계에서는 등유속선으로 표현되는 단면상의 위치와 유속 간에 1:1 관계가 성립한다. 단면에서 하폭방향과 연직방향의 성분으로 이루어진 직교좌표계는 Eq. (1)에 의해 $\xi-\eta$ 좌표계로 변환된다. 실제 유속분포의 계산에는 η 가 필요가 없으므로 ξ 만 계산하게 된다.

$$\xi = Z(1 - Y)^{\beta_j} \exp(\beta_j Y - Z + 1) \quad (1)$$

여기서 $Z = \delta_z / (h + \delta_z + \epsilon)$, $Y = |y| / (B_j + \delta_j)$ 이다. y 는 하폭방향 좌표, Z 는 연직방향 좌표로 최대유속 지점을 통과하는 연직선을 선택해야 한다. h 는 수심, B_j ($j=1$ 또는 2)는 연직축과 이루는 좌안 또는 우안 사이의 수면폭이다.

Eq. (1)에 관련된 ϵ , δ_j , δ_z , β_j 는 등유속선의 형상에 관계된 매개변수이다. 이 중 ϵ 은 연직방향으로 최대유속이 발생하는 수면으로부터의 거리이다. $\epsilon = 0$ 인 경우는 수면에서, $\epsilon > 0$ 인 경우 수면 위에서, $\epsilon < 0$ 인 경우 수면 아래에서 최대유속이 발생한다. δ_j , δ_z , β_j 는 등유속선의 형상을 미세하게 조정하는 변수이다.

2.2 Chiu의 유속분포식

엔트로피 유속분포식은 등유속선 ξ 상에서 유속 u 에 관한 확률밀도함수를 이용하여 도출된다. 확률밀도함수를 결정하기 위해 확률론적인 엔트로피 최대화 원리를 이용한다. 엔트로피 최대화 원리는 정상□평형 상태에

있는 계(系, system)는 엔트로피를 최대화하는 경향이 있다는 것이다. 이를 통해 등유속선 ξ 에서 무차원 유속 u^+ 를 나타내는 일반적인 유속분포식은 Eq. (2)와 같이 구할 수 있다. 이에 대한 자세한 유도 과정은 Chiu (1988)의 문헌에 기술되어 있다.

$$u^+ = \frac{u}{u_{\max}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} \right] \quad (2)$$

Eq. (2)는 M 을 매개변수로 갖는 개수로 단면에서의 2차원 유속분포에 관한 일반 공식이다. 즉, 단면상에서 특정 등유속선 ξ 상에 있는 모든 유속은 Eq. (2)에 의해 계산될 수 있다. Eq. (2)에서 M 은 유속분포의 동질성을 결정하는 수리학적 매개변수로 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$\phi(M) = \frac{\bar{u}}{u_{\max}} = e^M (e^M - 1)^{-1} - \frac{1}{M} \quad (3)$$

여기서 $\phi(M)$ 은 평균유속과 최대유속의 비율을 나타낸다. 하천의 특성을 나타내는 값으로 비교적 일정한 값을 가지는 것으로 알려져 있다(김영성 등, 2001; 추태호, 2002; Moramarco et al., 2004; 이찬주 등, 2007).

2.3 Chiu의 유속분포식의 매개변수 결정

Chiu and Chiou(1986)는 매개변수를 산정하기 위하여 인공수로에서 하폭과 수심, 조도계수를 변화시켜 실험과 모의를 실시하였다. 매개변수를 가정하여 모의된 값과 측정된 실험값을 반복□비교하여 조정함으로써 매개변수를 산정하였다. 산정된 매개변수의 범위는 각각 다음과 같이 제시되어 있다. ϵ 의 범위는 실험수로에서 $-0.587 \sim 0.045$ m이며, 하폭수심비($B/h > 10$)가 크고 Manning의 조도계수($n > 0.035$)크며 상대적으로 작은

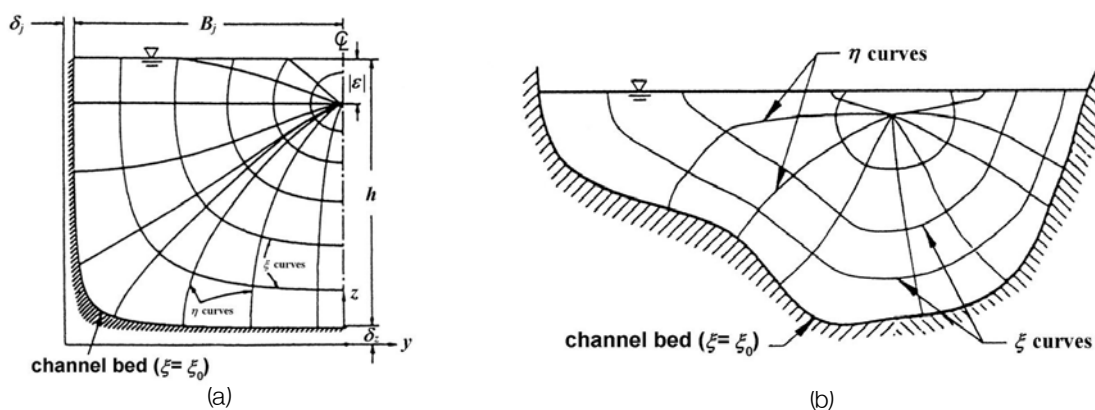


Fig. 2. $\xi-\eta$ Coordinates in Open-channel Sections(Chiu and Murray, 1992)

경사($S < 0.001$)에서는 ϵ 이 양의 값이고 큰 값이다. 따라서, 최대유속은 수면에서 발생한다. δ_j 와 δ_z 는 0에 가까운 값이다. β_j 의 범위는 0~1이며 Fig. 2에 보인 바와 같다. Fig. 2에서 $B = 2B_j$ 이며, n 은 Manning의 조도계수이다.

본 연구에서 대상으로 하는 자연하천은 Chiu and Chiou(1986)가 제시한 조건에 의하면 $\epsilon = 0$ 을 초기치로 사용하였으며 실측유속과 무차원 유속분포를 비교하여 조정하였다. δ_j 와 δ_z 는 0을 적용하였다. 또한 Fig. 2에 나타나 있는 자료를 회귀분석하여 다음과 같은 β_j 추정식을 개발하여 초기치 산정에 사용하였다. 추정식에 의한 값은 Fig. 2에서 점이 없는 실선으로 나타나 있다.

$$\beta_j = (1 - \beta_0)\exp\left[-\left(\frac{B/h}{b}\right)^a\right] + \beta_0 \quad (4)$$

여기서 $\beta_0 = 3.53\exp(-186n)$, $a = 1.8\exp(-21n)$, $b = 54\exp(-74n)$ 이다.

자연하천에서는 최대유속이 발생하는 지점에서 유속을 직접 측정하기 어려우며 실측유속 자료가 있어도 최대유속의 발생위치를 정확하게 알기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 최대유속 발생위치의 초기 추정치로 흐름단면 도심(centroid)의 y 좌표를 채택하였다. Chiu의 유속분포로부터 계산된 무차원유속분포와 실측자료를 비교하여 추정치에 오차가 있는 경우에는 무차원 유속분포의 최대유속 발생위치를 실측자료에 일치되도록 β_j 를 조정하였다.

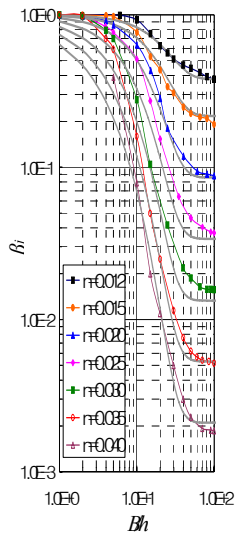


Fig. 2. Estimate Parameter β_j Versus B/h and Manning's n (Using Data of Chiu and Chiou, 1986)

유속분포에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수는 M 이다. Chiu(1988)는 \bar{u}/u_{\max} 의 범위가 0.5~0.9의 구간에서 M 이 2~10까지 변하는 것을 밝힌 바 있다. Xia(1997)는 자연하천에서 하천의 만곡에 따른 \bar{u}/u_{\max} 의 관계를 검토하였다. 선형구간에서는 유속과 평균유속의 관계가 선형이고, 만곡구간에서도 선형에 근사함을 보인 바 있다. Moramarco *et al.* (2004)은 이탈리아의 자연하천에서 \bar{u}/u_{\max} 가 0.667에 접근함을 밝혔다. 최근 우리나라 하천을 대상으로 연구를 진행한 이찬주 등(2007)도 국내 하천에서 ADCP를 유속측정 자료를 이용하여 이와 매우 유사한 결과를 제시한 바 있다.

본 연구에서는 각 지점의 최대유속과 측정유량을 단면적으로 나눈 평균유속을 이용하여 $\phi(M)$ 을 산정하였으며, 산정된 $\phi(M)$ 과 상관관계는 Fig. 3에 제시하였다. 산정된 $\phi(M)$ 으로부터 Eq. (3)으로부터 M 을 계산하였다. 또한, $\phi(M)$ 과 M 의 선형관계를 도출하여 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 3(d)의 송동 지점인 경우 $\phi(M) = 0.27$ 로 계산되었으며, 이 지점의 흐름단면은 중앙사주가 있어 매우 복잡하여 Chiu(1988)의 유속분포를 적용하기 곤란한 것으로 판단된다.

3. 유속분포 추정 및 유량산정

3.1 유속분포 추정

흐름단면의 좌표를 이용하여 Fig. 5에 보인 바와 같은 격자망을 구성할 수 있다. 무차원 유속 u^+ 는 각 격자의 중앙에서 정의되면 Eq. (2)에 의해 계산된다.

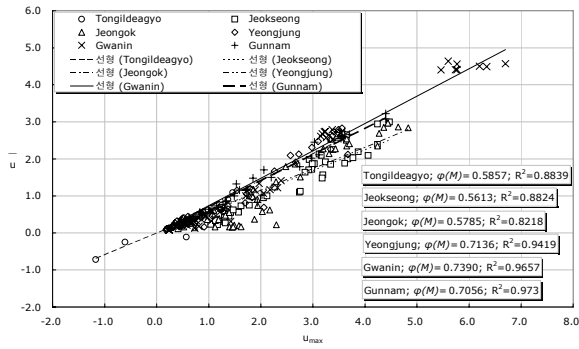
최대유속을 추정하기 위하여 실측유속 $u_{j,k}$ 와 무차원 유속 $u_{j,k}^+$ 간의 원점통과 선형회귀모형을 Eq. (5)와 같이 설정하였다.

$$u_{j,k} = \hat{u}_{\max} u_{j,k}^+ \quad (5)$$

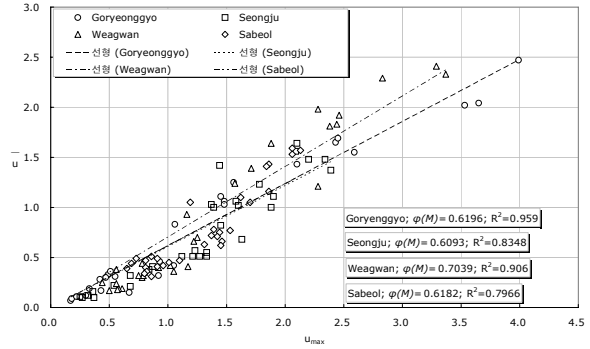
여기서 j, k 는 실측유속지점의 격자번호이고, \hat{u}_{\max} 는 회귀상수로 추정 최대유속이다. 부자(float)로 측정한 실측유속인 경우 Fig. 5에 보인 바와 같이 수면에서 흘수심까지 격자에 측선별로 1개의 측정유속을 적용한다. 통계분석을 통하여 u_{\max} 의 95% 신뢰도 구간을 계산할 수 있다.

무차원유속분포에 추정최대유속을 곱하면 Eq. (6)과 같이 추정 유속분포 $u_{j,k}^*$ 를 구할 수 있다.

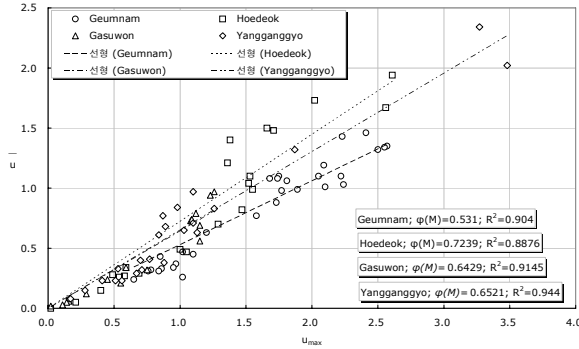
$$u_{j,k}^* = \hat{u}_{\max} u_{j,k}^+ \quad (6)$$



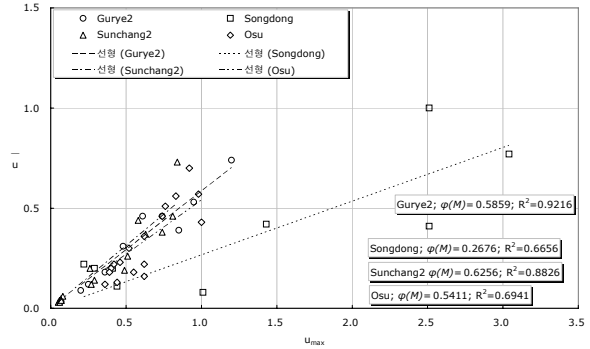
(a) Imjin river basin



(b) Nakdong river basin



(c) Geum river basin



(d) Seomjin river basin

Fig. 3. u_{max} and \bar{u} Relationship at Velocity Measurement Sites

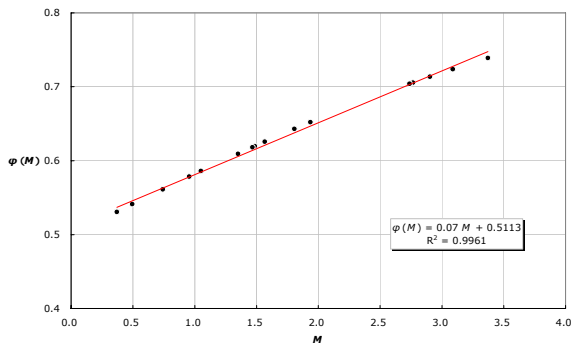


Fig. 4. $\phi(M)$ and M at Velocity Measurement Sites

여기서 j, k 는 흐름단면의 모든 격자번호이다.

3.2 유량산정

추정 유속분포 $u_{j,k}^*$ 를 흐름단면에 대하여 적분하면 추정유량 Q^* 를 Eq. (7)과 같이 구할 수 있다.

$$Q^* = \iint_A u^* dA = \sum_j \sum_k u_{j,k}^* \Delta y \Delta z \quad (7)$$

Fig. 6은 임진강 군남 지점에서 2006년 7월 3일 12:20에 Price-AA 유속계로 실측한 유속(×점)과 추정 유속

분포(실선)를 예로 도시한 것이다. 수위는 2.09 m이며, 유속면적법에 의한 유량(Q)은 963 m^3/s , 추정유량(Q^*)은 798 m^3/s (95 % 신뢰도 구간: 602 < Q^* < 994 m^3/s)이다. 이 경우 추정 최대유속의 결정계수는 0.80이었다. Fig. 7은 적성 지점에서 2006년 7월 16일 15:11에 부자로 실측한 유속(굵은 실선)과 추정 유속분포를 예로 도시한 것이다. 수위는 10.76 m이며, 유속면적법에 의한 유량(Q)은 9,489 m^3/s , 추정유량(Q^*)은 10,050 m^3/s (95 % 신뢰도 구간: 9,145 < Q^* < 10,945 m^3/s)이다. 이 경우 추정 최대유속의 결정계수는 0.40이었다. Fig. 7에서 가운데 부분의 추정 유속이 최대유속에 가깝게 나타나는데 이는 부자의 흘수심까지 동일한 유속을 적용하였기 때문이다. 부자에 의한 유속을 위치별로 분포시킬 수 있는 방법이 개발된다면 개선될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 부자를 이용한 경우보다는 Price-AA 유속계를 사용한 경우에 결정계수가 컸으며, 실측유속 자료가 많을수록 결정계수가 높아지는 경향을 보였다.

4. 자료수집 및 비교검토

4.1 유량측정 자료의 수집 및 분석

2005년도 유량측정성과(한강홍수통제소, 2006; 낙동

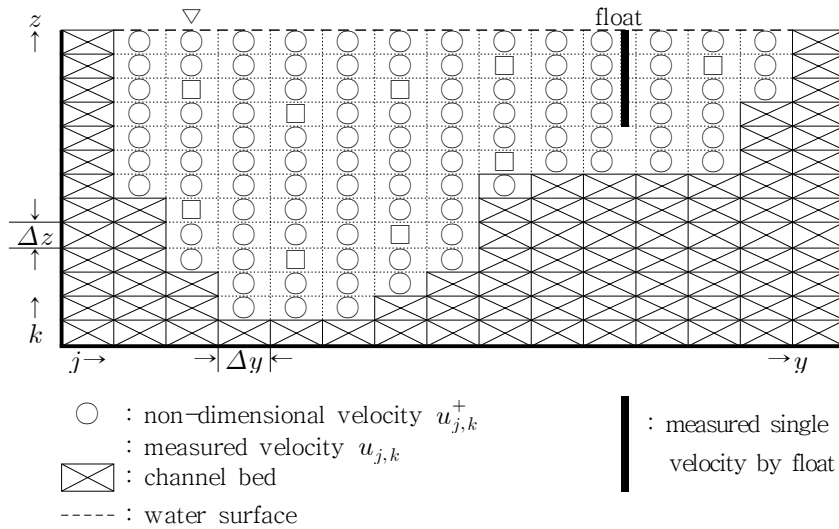


Fig. 5. Grids and Variables

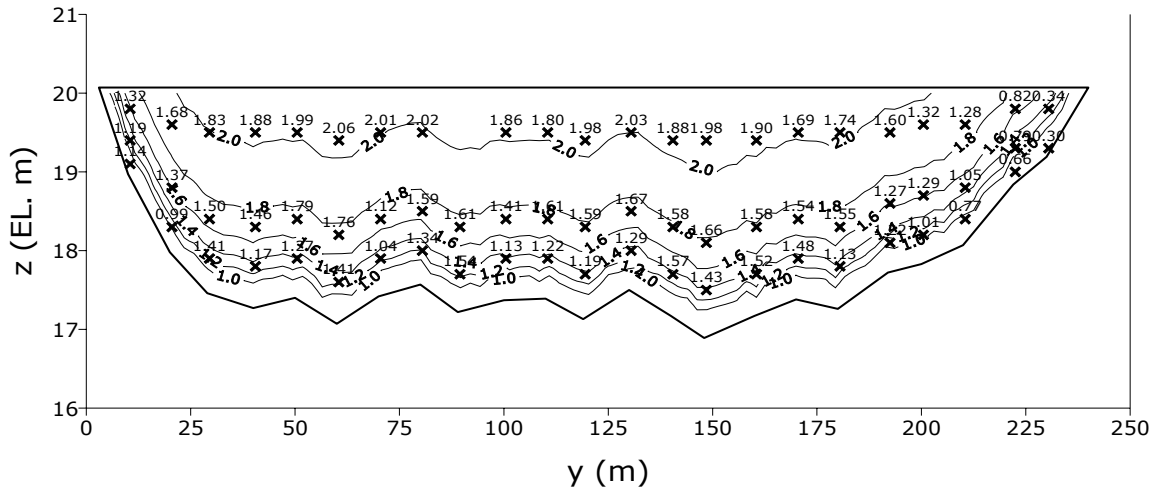


Fig. 6. Measured Velocities by Price-AA and Velocity Distribution by Eq. (6)

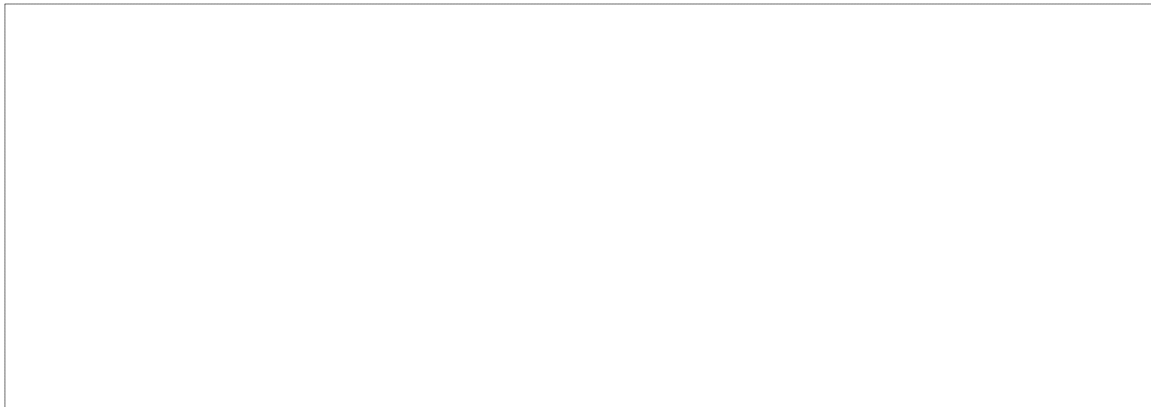


Fig. 7. Measured Velocities by Float and Velocity Distribution by Eq. (6)

강홍수통제소, 2006; 금강홍수통제소, 2006; 영산강홍수통제소, 2006) 중 불확실도가 낮은 자료를 대상으로 분석하였다. 분석 지점은 Table 1에 나타낸 바와 같이 18개 지점이며 측정시간의 누락, 부자의 흘수 미기재, 흐름분리 등의 문제가 있는 자료를 제외한 512개의 자료

를 분석하였다. 유량측정 장비로 수위가 낮을 경우에는 Price-AA 유속계, 수위가 높을 경우에는 부자가 사용되었다. 형상비(shape factor)는 $S_f = A/(Bh_{\max})$ 로 정의하였다.

Table 1. Flow Characteristics at the Gauged Sites

basin	site	Price-AA			float		
		no.	discharge Q_{AV} [m ³ /s]	shape factor	no.	discharge Q_{AV} [m ³ /s]	shape factor
Imjin	Tongildaegyo	12	-831.7 ~ 1,797.6	0.41 ~ 0.63	4	561.2 ~ 951.1	0.68 ~ 0.72
	Jeokseong	28	30.8 ~ 1,941.9	0.39 ~ 0.66	17	891.6 ~ 9,488.5	0.69 ~ 0.81
	Jeongok	27	12.7 ~ 367.8	0.52 ~ 0.77	17	476.1 ~ 4,401.5	0.71 ~ 0.83
	Yeongjung	32	2.3 ~ 125.6	0.45 ~ 0.73	15	225.6 ~ 1,462.7	0.68 ~ 0.81
	Gwanin	25	4.7 ~ 199.2	0.40 ~ 0.73	21	357.7 ~ 2,742.9	0.71 ~ 0.96
	Gunnam	35	18.4 ~ 963.0	0.42 ~ 0.76	15	330.2 ~ 6,330.2	0.71 ~ 0.83
Nakdong	Goryeonggyo	17	6.2 ~ 631.2	0.32 ~ 0.70	12	1,946.9 ~ 9,939.3	0.32 ~ 0.74
	Seongju	19	31.8 ~ 888.9	0.35 ~ 0.56	12	1,185.8 ~ 8,408.2	0.21 ~ 0.45
	Waegwan	20	55.5 ~ 985.5	0.27 ~ 0.65	11	1,754.6 ~ 7,736.7	0.76 ~ 0.81
	Sabeol	25	33.8 ~ 1,147.3	0.24 ~ 0.69	6	1,559.0 ~ 5,292.5	0.67 ~ 0.75
Geum	Geumnam	14	49.7 ~ 566.4	0.26 ~ 0.67	16	891.9 ~ 3,673.7	0.66 ~ 0.79
	Hoedeok	15	0.1 ~ 252.2	0.43 ~ 0.68	8	260.3 ~ 676.6	0.72 ~ 0.78
	Gasuwon	15	0.4 ~ 56.0	0.49 ~ 0.73	7	121.3 ~ 251.7	0.51 ~ 0.53
	Yangganggyo	12	14.2 ~ 256.6	0.41 ~ 0.50	12	181.9 ~ 2,004.7	0.59 ~ 0.71
Seomjin	Gurye2	9	18.5 ~ 359.0	0.44 ~ 0.62			
	Songdong	10	2.5 ~ 82.6	0.57 ~ 0.57			
	Sunchang2	18	0.2 ~ 10.3	0.43 ~ 0.80			
	Osu	18	1.8 ~ 45.3	0.39 ~ 0.82			
	sum	339			173		

4.2 측정유량과 추정유량 비교

유량의 검토는 측정 장비와 유역별로 구분하여 실시하였다. Price-AA 유속계를 이용한 유량측정의 경우 Fig. 8에 나타낸 바와 같다. 부자를 이용한 유량측정의 경우 Fig. 9에 나타낸 바와 같다. 섬진강의 경우 부자로 측정한 유량자료가 없기 때문에 Fig. 9에 나타나 있지 않다. Figs. 8과 9에서 가로축은 유속면적법에 의한 측정유량 Q , 세로축은 추정유량 Q^* 이다. 측정유량에 대한 추정유량 Q^* 와 더불어 추정유량의 95 % 신뢰도 구간 및 측정유량과 추정유량의 1:1 직선과 1:1 직선의 95 % 신뢰도 구간(철선)도 도시하였다. Figs. 8과 9에서 대부분의 측정유량 Q 는 추정유량 Q^* 의 95 % 신뢰도

구간 내에 위치하고 있다. 전반적으로 살펴보면 Price-AA 유속계에 의한 점유속 정보가 있는 경우보다 부자에 의한 선유속 정보가 있는 경우보다 추정유량이 1:1 직선에 근접함을 알 수 있다. 이에 대해서는 제 4.3 절에서 다시 다루어진다. 이는 Price-AA 유속계를 이용하면 전체 흐름단면 균등하게 분포된 정확한 유속을 측정하여 최대유속 추정에 유리하지만, 부자를 이용하면 제한된 흘수심 구간에서만 평균유속을 측정하여 최대유속 추정에 불리하다는 것을 시사한다. 예를 들어 낙동강의 고령과 성주 지점의 경우 홍수시 최대수심이 각각 14 m와 10 m를 초과하지만 부자의 흘수심은 최대 4 m에 불과하기 때문에 매우 제한된 유속 정보만을 얻을 수밖에 없다.

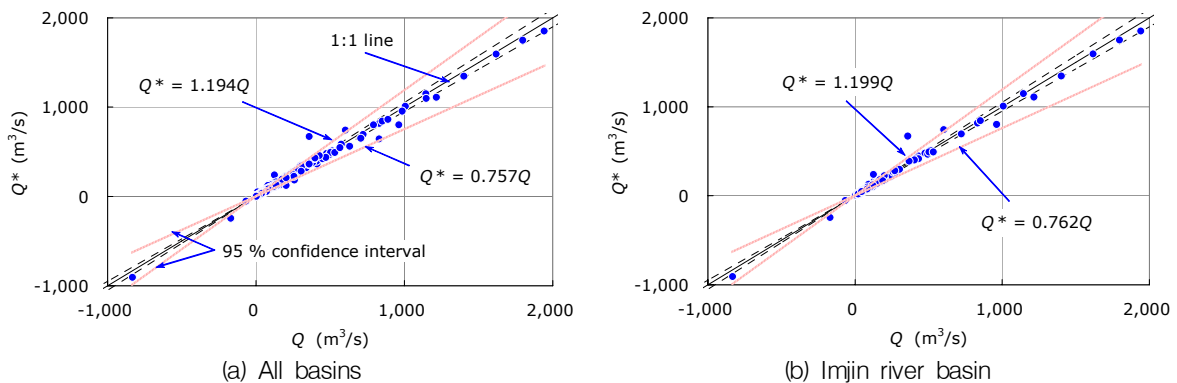
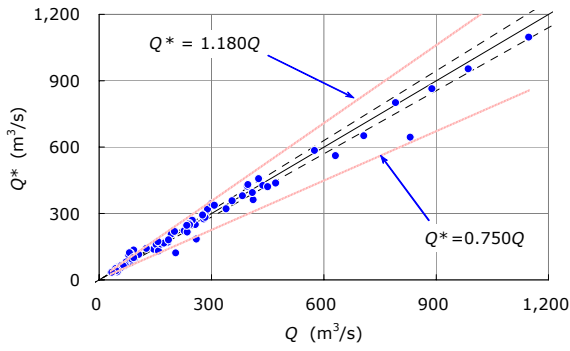
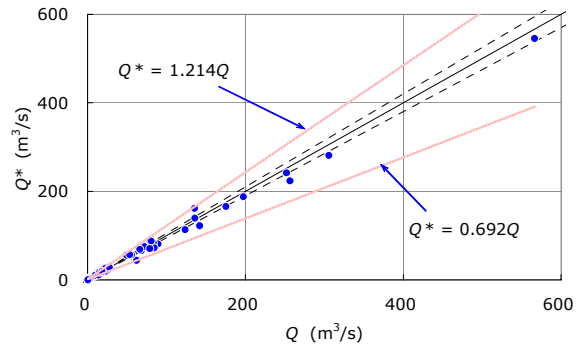


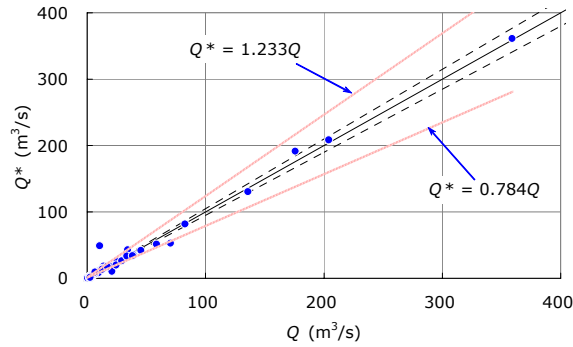
Fig. 8. Measured Discharge Q Versus Estimated Discharge Q^* by Price-AA (Continued)



(c) Nakdong river basin

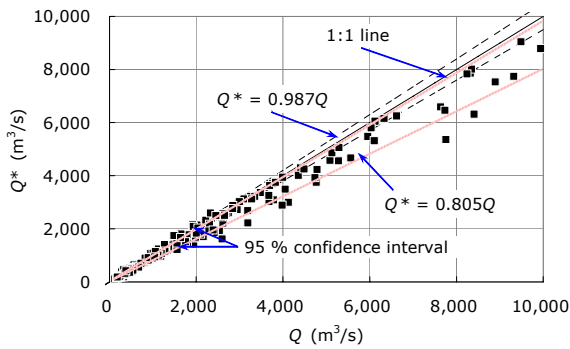


(d) Geum river basin

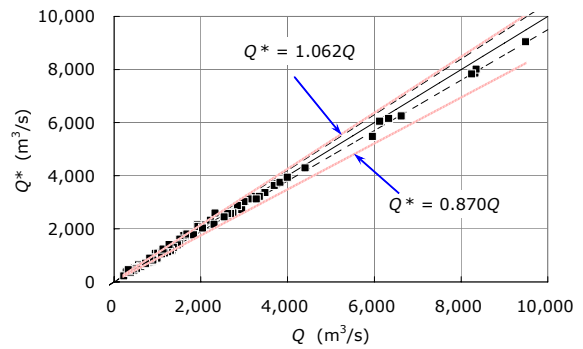


(e) Seomjin river basin

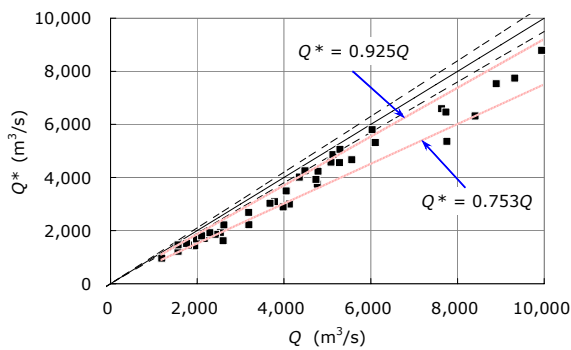
Fig. 8. Measured Discharge Q Versus Estimated Discharge Q^* by Price-AA



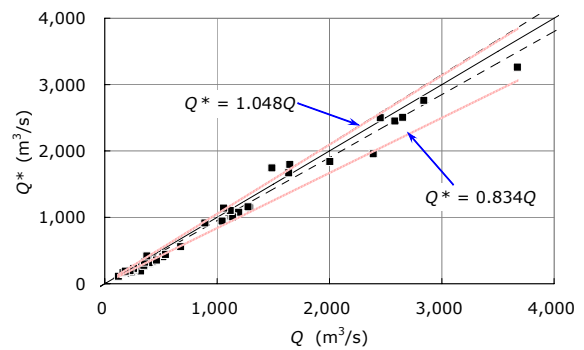
(a) All basins



(b) Imjin river basin



(c) Nakdong river basin



(d) Geum river basin

Fig. 9. Measured Discharge Q Versus Estimated Discharge Q^* by Float

4.3 오차 분석

측정유량(Q)과 오차($Q^* - Q$)의 관계는 Fig. 10에

보인 바와 같다. Price-AA와 같이 점유속 정보를 제공하는 경우가 부자와 같이 선유속 정보를 제공하는 경우

보다 추정유량의 오차가 작음을 알 수 있다. 오차가 작을수록 추정유량이 1:1 직선에 근접하게 된다.

Fig. 11은 상대오차(relative error) $(Q^* - Q)/Q$ 에 대한 것이다. 이 그림으로부터 Price-AA와 같이 점유속 정보를 제공하는 경우가 부자와 같이 선유속 정보를 제공하는 경우보다 상대오차가 역시 작음을 확인할 수 있다.

Fig. 11로부터 측정유량이 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 보다 작은 경우 상대오차 $\pm 25\%$ 를 벗어나는 자료가 많으며, $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 보다 큰 경우에는 상대오차 $\pm 25\%$ 를 벗어나는 자료는 거의 없음을 알 수 있다. 이는 저유속일 경우에 상대오차가 큼을 나타내는 것이다. 또한 김원 등(2004)의 하천 유량측정 지침과 ISO(International Organization For Standard, 1997)의 ISO-748'에도 상세히 나타나 있다. ISO-748에 의하면 유속이 0.1 m/s 보다 작은 경우에는 $\pm 10\%$, 0.03 m/s 보다 작은 경우에는 20% 정도의 측정유속에 불확실도가 있는 것으로 알려져 있다.

흐름단면의 특성에 따라 유량측정의 정확도를 알아보기 위하여 흐름단면의 형상비를 정의하였으며, 형상비는 흐름단면이 직4각형인 경우 1.0, 반원형인 경우 0.8, 3각형인 경우 0.5 정도의 값을 갖는다. Figs. 12와 13에서 알 수 있는 바와 같이 대부분 측정자료의 형상

비는 $0.25 \sim 0.75$ 의 값을 갖는다. 홍수터에 흐름이 발생하면서 극단적으로 수심이 얇고 하폭이 크며 단면형상이 복잡해지는 경우에 형상비가 1로 나타났다.

오차($Q^* - Q$)와 형상비의 관계는 Fig. 12에 보인 바와 같다. Fig. 12로부터 Price-AA를 이용한 경우는 형상비에 무관하게 절대오차가 작으나, 부자를 이용하는 경우 형상비 0.5 보다 작은 범위는 수로단면이 매우 불규칙한 경우에 나타나며, 이러한 이유로 유량산정시 오차가 발생된 것으로 사료되며, 0.75 부근에서 절대오차가 큰 이유는 홍수시 최대수심이 $10 \sim 14 \text{ m}$ 에 이르는 조건에서 흘수심 4 m인 부자로 측정된 자료로 유량산정시 발생된 오차로 판단된다.

Fig. 13은 상대오차와 형상비의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 13으로부터 대부분의 유량자료가 상대오차 $\pm 25\%$ 범위에 있으나 형상비가 1에 가깝고 유량이 적어 Price-AA를 이용한 경우에는 상대오차가 다소 큼을 알 수 있다.

이러한 결과가 나타내는 바는 본 연구에서 개발된 유량산정 기법을 이용하여 유속계에 의한 유량측정결과를 검증하거나, 유량을 산정할 수 있음을 시사하고 있다. 부자를 이용한 유량측정자료의 적용에는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

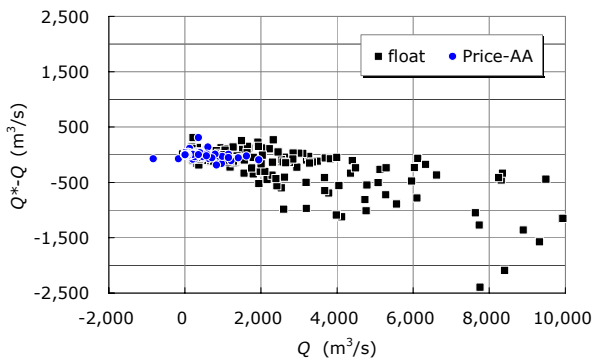


Fig. 10. $Q^* - Q$ with Discharge

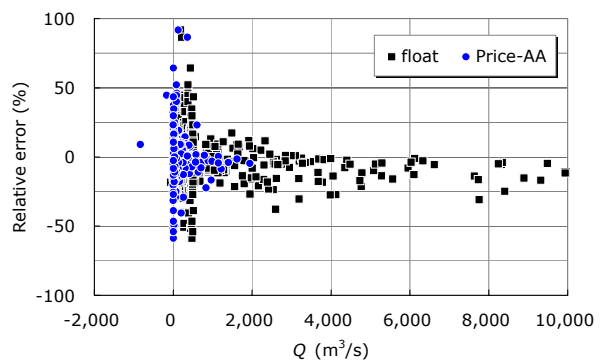


Fig. 11. Relative Errors with Discharge

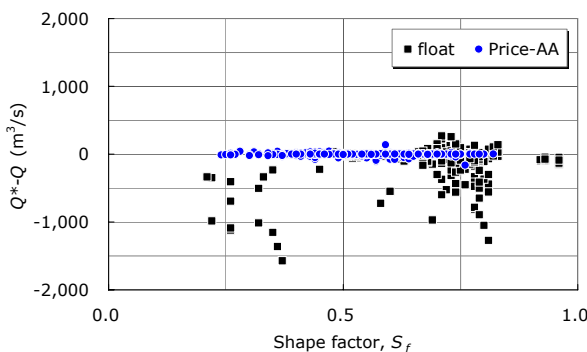


Fig. 12. $Q^* - Q$ with Shape Factor

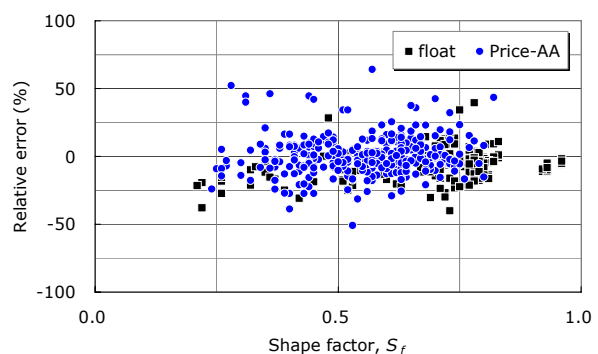


Fig. 13. Relative Errors with Shape Factor

5. 결 론

본 연구에서는 Chiu(1987, 1988)가 제시한 엔트로피 개념의 무차원 유속분포와 최대유속 추정을 결합하여 자연하천의 유량을 추정하는 방법을 제시하였다. 또한 유속면적법을 이용하여 획득된 유량측정 성과와 본 연구에서 추정한 유량을 비교검토했다. 본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 구한 추정유량은 기존 유속면적법을 이용하여 실측한 하천유량과 매우 유사한 값을 보이고 있다.
- 2) Price-AA를 이용하여 유속을 측정할 경우 측선의 수심에 따라 정해진 지점에서 유속을 측정하여야 하는데, 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 임의의 측선과 측점에서 유속을 측정하여도 비교적 정확한 유량계산이 가능하다.
- 3) 유속이 매우 작은 경우 또는 홍수터에 흐름이 발생하면서 극단적으로 수심이 얇고 하폭이 크며 단면형상이 복잡해지는 경우에는 유속면적법과 본 연구에서 제시한 방법으로 계산한 유량 간에 차이가 클 수 있다.
- 4) 주 수로가 2개로 나누어지거나 흐름단면의 비대칭성이 심한 경우에는 엔트로피 개념의 무차원 유속분포가 실제 자연하천의 흐름분포에서 멀어지기 때문에 본 연구에서 제시한 방법을 적용할 수 없다.

엔트로피 개념에 의한 무차원 유속분포를 결정하기 위해서는 여러 가지 매개변수를 추정하여야 하는데 M 값을 제외하고는 대부분 매개변수가 수리실험 결과로부터 도출된 것으로 자연하천의 유속자료를 이용하여 이들 매개변수의 추가적인 보완이 필요하다. 도출된 결과로부터 제한사항에 해당되지 않는 자연하천에서는 기존의 방법보다 적합한 무차원 유속분포를 구할 수 있으며, 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 유량산정의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 한강홍수통제소 한강유역 수자원시험장비 설치 및 운영(5단계) 연구사업에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

금강홍수통제소 (2006). **금강수계 유량측정조사 보고**

서(금남, 양강교, 제원, 심천), 금강홍수통제소.

김영성, 양재린, 추태호, 고익환, 김우구 (2001). "엔트로피를 이용한 유량측정기법의 국내하천에의 적용." **대한토목학회 2001 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 1-4.

김원, 윤광석, 이을래, 김치영, 김동구, 차준호, 박은희 (2004). **하천 유량측정 지침**. SWRRC Technical Report TR 2004-01, 과학기술부/건설교통부 21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단.

김창완, 이민호, 정상화, 민인홍 (2004) "초음파유량계를 이용한 실시간 하천유량측정." **2004년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, CD.

김치영, 김원, 이찬주, 김동구 (2006) "유속지수법을 이용한 자동유량측정." **2006년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, CD.

낙동강홍수통제소 (2006). **낙동강수계 본류(왜관 외 4개소) 유량측정조사용역 보고서**, 낙동강홍수통제소.

영산강홍수통제소 (2006). **섬진강수계 화개 등 4개 지점 유량측정용역 보고서**, 영산강홍수통제소.

오제승, 김병식, 김형수, 서병하 (2005). "홍수량 추정을 위한 유량산정기법에 관한 연구." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제3B호, pp. 207-213.

이찬주, 서일원, 김창완, 김원 (2007). "Chiu가 제안한 2차원 유속분포식의 자연하천 적용성 분석." **한국수자원학회논문집**, 수자원학회, 제40권, 제12호, pp. 957-968.

추태호 (2002). "낙동강하구둑 방류량 산정방법 개선연구-엔트로피 개념에 의한 유량측정방법 적용-" **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제4-B호, pp. 485-494.

한강홍수통제소 (2006). **임진강유역 유량측정 및 개선방향 연구용역 보고서**, 한강홍수통제소.

Chiu, C.-L. (1987). "Entropy and probability concepts in hydraulics." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 5, pp. 583-600.

Chiu, C.-L. (1988). "Entropy and 2-D velocity distribution in open channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 7, pp. 738-758.

Chiu, C.-L. and Chiou, J.-D. (1986). "Structure of 3-D flow in rectangular open channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 11, pp. 1050-1068.

Chiu, C.-L. and Murray, D. W. (1992). "Variation of

velocity distribution along nonuniform open-channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 989-1001.

Chiu, C.-L. and Said, C. A. A. (1995). "Maximum and mean velocities and entropy in open channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 1, pp. 26-35.

Chiu, C.-L. and Tung, N.-C. (2002). "Maximum and regularities in open-channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 390-398.

Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, pp. 24-25.

de Araujo, J. C. and Chaudhry, F. H. (1998). "Experimental evaluation of 2-D entropy model for open-channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 10, pp. 1064-1067.

International Organization For Standard (1997). *Measurement of liquid flow in open channels - velocity-area method*. ISO-748 Third edition 1997-08-01. pp. 19-24.

Moramarco, T., Saltalippi, C., and Singh, V. P. (2004). "Estimation of mean velocity in natural channels based on Chiu's velocity distribution equation." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 1, pp. 42-50.

Xia, R. (1997). "Relation between mean and maximum velocity in natural river." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 8, pp. 720-723.

기 호

- A : cross sectional area
- B_j : top width of cross section on one side of z -axis
- B : width of channel
- h, h_{\max} : water depth along z -axis at a cross section, maximum water depth
- M : dimensionless variable or parameter of velocity distribution
- Q : volume rate or flow (discharge) through a channel cross section
- S_f : shape factor of cross section
- a, b, β_0 : parameters of β_j
- c : parameter of index velocity method
- j, k, y, z : Cartesian coordinates in vertical and transverse directions of channel flow
- n : Manning's coefficient
- u : time-averaged point velocity in longitudinal direction
- \bar{u}, u_{\max} : cross-sectional mean and maximum values of u
- u^+, \hat{u}_{\max} : non-dimensional velocity in isovel ξ , estimated maximum velocity by regression
- $\epsilon, \beta_j, \delta_j, \delta_k$: parameters of isovel ξ equation
- ξ, η : curvilinear coordinates based on isovels of primary flow
- ξ_0, ξ_{\max} : minimum and maximum values of ξ

(논문번호:08-29/접수:2008.02.29/심사완료:2008.04.10)